УДК 691.327
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-24-33

Научная статья

Разработка лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений при строительстве атомной электростанции «АККУЮ»

И. Ф. Развеева ✉, С. А. Иванченко, И.В. Бондаренко, М. П Котенко , А. А. Федчишена

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ razveevai@mail.ru

Аннотация

Введение. Бетон является одним из наиболее часто применяемых материалов в строительстве, поэтому технологии его изготовления постоянно совершенствуются. В нашей статье мы разработаем лабораторные составы бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений, существующих на площадке при строительстве одной из АЭС в Турецкой Республике. Одним из результатов разработки технологии проектирования бетона является самоуплотняющийся бетон, который повышает устойчивость строительства из-за значительного сокращения потребляемой энергии. Самоуплотняющийся бетон – это разновидность бетона, который может полностью заполнить опалубку только самотеком, без необходимости вибрационного уплотнения. Его высокая текучесть и заполняющая способность – вот что дает ему преимущество перед обычным бетоном. Самоуплотняющийся бетон обладает высокой текучестью, высокой водоудерживающей способностью, хорошей прочностью. Задачей исследования являлось получение лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений, существующих на строительной площадке.

Материалы и методы. Определен перечень сырья, потенциально отвечающего требованиям проектной документации. Подобраны составы бетонов с применением различных заполнителей, определено минимальное количество цемента, в том числе, с целью повышения коррозионной стойкости.

Результаты исследования. На основании имеющихся ограничений на строительной площадке и по итогам анализа сырьевых материалов с определением их оксидного состава было разработано 5 составов для каждой конструкции АЭС.

Обсуждение и заключения. В исследовании выполнены все поставленные задачи, основными из которых являются: анализ рынка сырьевых материалов, проведение лабораторных исследований сырьевых материалов, определение их фактических физико-механических характеристик, определение компонентов, отвечающих нормам и требованиям, получение лабораторных составов бетонных смесей с классификацией по их назначению. Указаны перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, бетон для строительства промышленных сооружений, коррозионная стойкость, агрессивное воздействие на бетон

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их совершенствованию способствовали значительному повышению качества настоящей статьи.

Для цитирования. Развеева, И.Ф. Разработка лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений при строительстве атомной электростанции «АККУЮ» / И. Ф. Развеева, С. А. Иванченко, И.В. Бондаренко, М. П Котенко, А. А. Федчишена // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 1. — С. 24–33. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-24-33

Original article

Development of Laboratory-made Compositions of Concrete Based on the Certain Raw Materials and Restrictions of the AKKUYU NPP Construction

Irina F. Razveeva ✉, Sergey A. Ivanchenko, Ivan V. Bondarenko, Maria P. Kotenko , Anastasia A. Fedchishena

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ razveevai@mail.ru

Abstract

Introduction. Concrete is one of the materials most frequently used in construction thus the technologies of its manufacturing are being constantly improved. In our article we will develop the laboratory-made compositions of concrete based on the certain raw materials resources and restrictions existing at the construction site of one of the nuclear power plants in the Republic of Türkiye. One of the results of elaborating the concrete composition design technology is the self-compacting concrete that fosters sustainable construction due to significant reduction of energy consumption. Self–compacting concrete is a type of concrete that can completely fill in the formwork only by gravity, without need for concrete consolidating by vibration. Its high fluidity and filling capacity are its advantages over conventional concrete. Self-compacting concrete has high fluidity, high water retention capacity, good strength. The aim of the study was to obtain the laboratory-made compositions of concrete based on the certain raw materials resources and restrictions existing at the construction site.

Materials and methods. The list of raw materials potentially meeting the design documentation requirements has been specified. The concrete compositions using various aggregates were selected, the minimum amount of cement was determined, aimed among other things at corrosion resistance improvement.

Results. Based on the restrictions existing at the construction site and according to the results of raw materials analysis including their oxide composition specification, 5 compositions were developed for each of NPP engineering structures.

Discussion and conclusions. The study has completed all the tasks set forth, the main of which are: analysis of the raw materials market, laboratory studies of raw materials, specification of their actual physical and mechanical properties, identification of components meeting the standards and requirements, obtaining the laboratory-made compositions of concrete mixtures classified by their designation. The perspectives for further research are indicated.

Keywords: self-compacting concrete, concrete for building the industrial structures, corrosion resistance, aggressive effect on concrete.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the reviewers, whose critical evaluation of the submitted materials and suggestions on improvement thereof contributed much to article's quality enhancement.

For citation. I. F. Razveeva, S. A. Ivanchenko, I.V. Bondarenko, M. P. Kotenko, A. A. Fedchishena. Development of Laboratory-made Compositions of Concrete Based on the Certain Raw Materials and Restrictions of the AKKUYU NPP Construction. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 1, pp. 24–33. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-1-24-33

Введение. В последние годы технология бетона совершенствуется в связи с тем, что он является наиболее часто используемым строительным материалом в мире. Знание передовых методов проектирования бетона также улучшилось в последнее время из-за того, что разрабатываются различные типы бетона, содержащие различные добавки [1–8]. Одним из результатов разработки технологии проектирования бетона является самоуплотняющийся бетон (СУБ). Самоуплотняющийся бетон определяется как вяжущий материал, который может течь под собственным весом. Впервые он был разработан в конце 1990-х годов в Японии.

СУБ — это усовершенствованный материал, обладающий аналогичной прочностью и долговечностью по сравнению с традиционным вибробетоном [9, 10]. Несмотря на то, что СУБ широко используется в строительной практике, разработка правильной смеси СУБ по-прежнему является сложной задачей. Основной причиной этого является тот факт, что бетон сам по себе является квазихрупким материалом [11], СУБ требует соответствующего расхода, и чаще, в качестве побочных продуктов, в состав добавляются промышленные отходы: зола-уноса, микрокремнезем и молотый гранулированный доменный шлак [12]. Существуют определенные побочные продукты отходов, которые при включении в вяжущую систему в качестве частичной замены цемента существенно снижают требуемую энергию и выбросы CO_2.

Молотый гранулированный доменный шлак представляет собой мелкодисперсный порошок, получаемый как побочный продукт (при помоле в доменной печи) металлургической промышленности. В последнее время все больше исследований сосредоточено на изучении поведения вяжущих композитов, содержащих металлургический шлак. Это исследование особенно связано с механическими свойствами затвердевших цементных композитов (например, прочностью на сжатие [13], [14], [15], прочностью на растяжение [16], усадкой и деформацией ползучести [17]).

Целью данного исследования является разработка лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений, существующих на площадке при строительстве одной из АЭС в Турецкой Республике.

Основными задачами данного исследования являются:

– определение сырьевой базы для производства бетонных смесей с учетом химико-минералогического состава сырьевых материалов и уровня технологии на предприятиях-изготовителях, определение соответствия отраслевым нормам атомной энергетики, российской, европейской и турецкой национальным нормативным базам;

– разработка лабораторных составов бетона на основе определенной сырьевой базы и ограничений, существующих на строительной площадке.

Материалы и методы. По результатам анализа рынка сырьевых материалов для производства бетона был определен перечень сырья, потенциально отвечающего требованиям проектной документации на одной из АЭС «АККУЮ», который представлен в таблице 1.

Таблица 1

Перечень сырьевых материалов для производства бетонных смесей

Вид материала	Марка	Производитель/поставщик
Цемент	Adana CEM III 42,5N	ADANA Cimento Sanayii T.A.S.
	Medcem CEM I 42,5 R	MEDCEM MADENCILIK VE YAPI MALZEMELERI SAN. VE TIC. A.S.
	Medcem CEM I 52,5 N	MEDCEM MADENCILIK VE YAPI MALZEMELERI SAN. VE TIC. A.S.
	Medcem CEM II/B-LL 32,5	MEDCEM MADENCILIK VE YAPI MALZEMELERI SAN. VE TIC. A.S.
Шлак металлургический	Iskanderun 2	ADANA CIMENTO SANAYII T.A.S. Fabrika ISKENDERUN-2
Песок кварцевый	$M_к$=2,04	MUSTAFA SIMSEK- SIMSEK KUM CAKIL OCAGI
	$M_к$=2,45	MUSTAFA SIMSEK- SIMSEK KUM CAKIL OCAGI
	$M_к$=2,47	OZMUTLUBETON INS.SAN.VE TIC.LTD.STI
Щебень известняковый	Фр 5-12	H.C.G. INSAAT VE TICARET ANONIM SIRKETI
	Фр 12-22	OZALTIN INSAAT A.S.
Щебень базальтовый	Фр 5-10, М1400	Измир №1/Гюрсель
	Фр 5-10, М1400	Измир №3/Гюрсель
	Фр 10-30, М1200	Конья
Мука базальтовая	–	Измир №3/Гюрсель

В соответствии с требованиями нормативно-технической и проектной документации на АЭС при изготовлении массивных железобетонных конструкций необходимо применять нормально твердеющие клинкерные цементы, где C_3S и C_3A не должно превышать 60 % и 7 % соответственно, а суммарное содержание C_3A+C_4AF не более 22 %. Так как по результатам лабораторных исследований цементов, представленных в таблице 1, не было выявлено ни одного вяжущего, соответствующего данным требованиям, то было принято решение применять портландцемент ЦЕМI 42,5Н пробной партии, выпущенный заводом Medcem (MEDCEM MADENCILIK VE YAPI MALZEMELERI SAN. VE TIC. A.S.) специально для разработки самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБС). Физико-механические характеристики и минералогический состав пробной партии цемента представлен в таблицах 2-3.

Таблица 2

Физико-механические характеристики ЦЕМI 42,5Н

Наименование	Показатель
Удельная поверхность $см^2/г$	3632
Начало схватывания, мин	270
Нормальная густота, %	24,6
Прочность в возрасте 1 сут, МПа	7,6
Прочность в возрасте 7 сут, МПа	33,8
Прочность в возрасте 28 сут, МПа	48,8

Таблица 3

Минералогический состава ЦЕМI 42,5Н

Наименование	Показатель
Содержание C_3S, %	54,0
Содержание C_2S, %	17,6
Содержание C_3A, %	3,3
Содержание C_4AF, %	13,6
Содержание C_3A+C_4AF, %	16,9

Для прочих бетонов классов В7,5-В25 применялся цемент ЦЕМI 42,5R, производства Medcem (MEDCEM MADENCILIK VE YAPI MALZEMELERI SAN. VE TIC. A.S.).

Согласно требованиям стандарта Турецкой Республики, TS 13515, не допускается разогрев бетонных блоков выше 65 °С (с 2019 года предел увеличен до 70 °С), в связи с этим было принято решение минимизировать расход клинкерного вяжущего за счет введения молотого доменного металлургического шлака или золы-уноса. Кроме того, введение шлаков и зол является обязательным условием для применения потенциально реакционноспособных заполнителей.

Так при подборах состава применялся шлак «Iskanderun 2», производства ADANA CIMENTO SANAYII T.A.S. Fabrika ISKENDERUN-2.

Так как по результатам лабораторных испытаний было установлено, что щебень из карьеров «Хэджеге» и «Ченгиз» не соответствуют требованиям к сырьевым материалам для производства СУБС и бетонов класса по прочности В35 и выше, то в качестве крупного плотного заполнителя применялся базальтовый щебень месторождения близ г. Конья (Турецкая Республика).

Также отметим, что первые подборы составов бетонов и макетирования производились с применением базальтов. Но, исходя из высоких рисков реакционной способности заполнителя, требований по проведению длительных испытаний по коррозионной стойкости, исходя из принципов эквивалентных характеристик и наличия на территории строительства атомной станции известнякового карьера «Cengiz», принято решение об использовании отсева дробления 0-4 мм и щебня фракций 4-11 и 11-22 мм данного карьера.

В качестве мелких заполнителей применялись:

– отсев дробления известняка, фракция 0–4 мм, производства «H.C.G. INSAAT VE TICARET ANONIM SIRKETI»;

– песок кварцевый, фракция 0–1 мм, производства «DENKA YAPI ONARIM İNŞAAT MADENCİLİK AKARYAKIT NAKLİYAT TURİZM SANAYİ VE TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ»;

– песок кварцевый, фракция 1–3 мм, производства «DENKA YAPI ONARIM İNŞAAT MADENCİLİK AKARYAKIT NAKLİYAT TURİZM SANAYİ VE TİCARET LİMİTED ŞİRKETİ.».

В качестве химических добавок применялись гиперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров «Rheoplast PCE3240» и «Rheoplast PCE3241», производства ООО «Реопласт».

В соответствии с требованиями ГОСТ 26633 минимальный расход цемента, ввиду отсутствия требований в проекте к классам эксплуатации конструкций, на начальном этапе был установлен на уровне 150 кг/м^3 при условии подтверждения проектных требований по плотности и водонепроницаемости. Однако расход цемента был увеличен до 170 кг/м^3 для соответствия требованию класса эксплуатации XS1 [СП 28.13330.2017] с учетом применения шлака, так как объект находится в береговой зоне Средиземного моря, с учетом требования TS EN.

В расчет минимально требуемого количества цемента для разных классов экспозиции принимается только расход, не превышающий расход цемента. Если шлак превышает расход цемента, считается с k=0, т.е. превышающий шлак учитывается, как инертный микронаполнитель.

Пример: 150 кг цемента и 300 кг шлака. В расчет берем только 150 кг шлака, равного расходу цемента с коэффициентом k=0,8 (150×0,8=120 кг) 150+120=270 кг. Смотрим по таблице (TS13515), чему удовлетворяет 270 кг цемента — выходит XC1. Для удовлетворения XS1 требуется минимум 167 кг цемента CEM I и столько же шлака.

Далее, по требованию НИИЖБ, с целью возможного повышения коррозионной стойкости бетона, высказано предложение об увеличении минимального расхода цемента до 230 кг. Национальный стандарт Турецкой Республики TS 13515:2019 (дополнительный стандарт для применения негармонизированного EN 206:2013 + A1 на территории Турецкой Республики), в дополнение к европейскому, при использовании цемента ЦЕМI допускает применение в расчетах k-фактора для молотого гранулированного шлака, равного 0,8 (в EN206-0,6), что соответствует увеличению расчетного расхода активной минеральной добавки в композиционном вяжущем, при расходе цемента до 184 кг/м^3.

Так как сооружения АЭС находятся в непосредственной близости от берега Средиземного моря, необходимо предусмотреть воздействие на бетон железобетонных конструкций следующих агрессивных факторов:

– действие грунтов, содержащих растворимые соли, сульфаты и хлориды;

– действие подземных вод;

– действие влажного воздуха;

– действие аэрозолей морских солей.

В соответствии с требованием п. 4.7.10 ГОСТ 26633-2015 в качестве крупного заполнителя бетона классов по прочности на сжатие B60 и выше следует применять щебень из плотных горных пород по ГОСТ 8267 марки по дробимости не ниже 1200. Содержание зерен слабых пород в щебне для бетона классов B60 и выше не должно превышать 5 % массы.

Согласно требованиям проектной документации, на АЭС «Аккую» в требованиях к крупному заполнителю на СУБ указано:

– форма зерен должна быть кубовидная, содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы не должно превышать 35 %;

– содержание пылевидных и глинистых частиц не должно превышать 1 %, допускается большее содержание пылевидных частиц при условии подтверждения этого лабораторными испытаниями бетона;

– содержание зерен слабых пород — не более 5 %.

Рентгенофлуоресцентный анализ осуществлялся на спектрометре ARL Perform′x 4200C («Термо», США). Материал анода рентгеновской трубки — родий, атмосфера — вакуум. Обработка полученных данных проводилась с помощью программного обеспечения UniQuant компании Thermo Scientific.

Результаты исследования. Все сырьевые материалы, представленные в таблице 1, были проанализированы методом рентгенофлуоресцентного анализа для определения их оксидного состава. Данные результатов испытаний приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4

Данные результатов рентгенофлуоресцентного анализа по определению оксидного состава

Образцы	Содержание оксидов, %											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	Cl
CEM III 42,5N Adana	23±1	6,7±0,7	2,0±0,2	52±1	3,2±0,3	3,9±0,4	–	0,77±0,08	0,52±0,05	0,53±0,05	0,056±0,006	0,027±0,003
CEM I 42,5 R Medcem	18±1	4,1±0,4	3,5±0,3	68±1	3,5±0,3	1,3±0,1	–	0,68±0,07	0,050±0,005	0,37±0,04	0,041±0,004	0,016±0,002
CEM I 52,5 N Medcem	18±1	4,2±0,4	3,5±0,3	68±1	3,7±0,4	1,3±0,1	0,07±0,01	0,74±0,07	0,042±0,004	0,38±0,04	0,056±0,006	0,017±0,002
Песок кварцевый Мк=2,45 «Гюрсель»	13±1	1,6±0,2	1,7±0,2	44±1	0,08±0,01	6,4±0,6	0,19±0,02	0,18±0,02	0,043±0,004	0,11±0,01	0,050±0,005	0,007±0,001
Песок кварцеый «Мутлу-Бетон»	16±1	1,8±0,2	1,9±0,2	40±1	0,052±0,005	7,2±0,7	0,12±0,01	0,19±0,02	0,047±0,005	0,11±0,01	0,060±0,006	0,009±0,001
Известняк местор-я «Хэджеге»	0,50±0,05	0,32±0,03	0,07±0,01	63±2	0,022±0,002	0,58±0,06	–	0,026±0,003	–	0,014±0,001	0,018±0,002	0,010±0,001
Известняк местор-я «Озалтын»	0,46±0,05	0,30±0,03	0,15±0,02	40±1	0,077±0,008	17±1	0,20±0,02	0,020±0,002	0,005±0,001	0,010±0,001	0,010±0,001	0,020±0,002
Шлак доменный «Эскандерун 2»	30±1	9,2±0,9	0,86±0,08	33±1	1,6±0,2	5,0±0,5	0,18±0,02	0,62±0,06	0,82±0,08	0,46±0,05	0,018±0,002	0,003±0,001
Базальт местор-я «Конья»					0,073±0,007							

Таблица 5

Данные результатов рентгенофлуоресцентного анализа по определению оксидного состава

Образцы	Содержание оксидов, %											
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	F	MgO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	Cl
Базальт местор-я «Измир №1»	54±2	16±1	6,0±0,6	7,3±0,7	0,24±0,04	1,9±0,2	2,2±0,2	2,7±0,3	0,11±0,01	0,70±0,07	0,23±0,02	0,067±0,006
Базальт местор-я «Измир №3»	53±2	15±1	6,1±0,6	7,4±0,7	0,21±0,04	2,1±0,2	2,2±0,2	2,8±0,3	0,11±0,01	0,69±0,07	0,22±0,02	0,059±0,006
Базальт местор-я «Конья»	58±2	18±1	6,4±0,6	5,8±0,6	0,22±0,04	0,43±0,04	2,7±0,3	2,7±0,3	0,10±0,01	0,73±0,07	0,34±0,03	0,016±0,002
Мука базальтовая «Измир №3»	55±2	16±1	5,5±0,6	7,1±0,7	0,21±0,04	1,9±0,2	2,5±0,3	2,4±0,2	0,10±0,01	0,61±0,06	0,26±0,03	0,041±0,004

На основании имеющихся ограничений и по итогам лабораторных апробаций были разработаны следующие составы бетонных смесей (см. таблицы 6-8).

Таблица 6

Экспериментальные лабораторные составы бетонных смесей

Маркировка состава	Назначение бетонной смеси	Цемент CEM I 42,5 R Medcem кг/м³	Зола Isken, кг/м³	Вода, кг/м³	Песок известняковый из отсева дробления (Мкр=2,76), HCG, кг/м³	Щебень известняковый, фракция 4-12 мм, HCG, кг/м³	Щебень известняковый, фракция 12-22 мм, HCG, кг/м³	Супер-р PCE3240, % от массы вяжущего	V вовлеченного воздуха, %
БСТ B7,5W4П4	Рядовые конструкции	180	80	180	1123	363	382	0,90	1,50
БСТ B10W4П4		190	70	180	1125	364	383	0,90	1,50
БСТ B15W4П4		210	50	180	1129	365	384	0,90	1,50
БСТ B20W4П4		240	30	180	1128	365	384	0,90	1,50
БСТ B20W8П4		240	50	175	1121	363	382	0,95	1,50
БСТ B25W4П4		280	30	175	1115	361	380	0,95	1,50
БСТ B25W6П4		280	40	175	1108	359	377	0,95	1,50
БСТ B20W6П4	Рядовые конструкции, подбетонка	240	70	175	1102	318	413	0,95	1,50
БСТ B25W8П4		280	50	175	1095	316	410	0,95	1,50

Таблица 7

Экспериментальные лабораторные составы бетонных смесей

Маркировка состава	Назначение бетонной смеси	Цемент CEM I 42,5 N Medcem, кг/м³	Шлак ISKENDERUN 2, кг/м³	Вода, кг/м³	Песок известняковый из отсева дробления (Мкр=2,76), HCG, кг/м³	Песок речной DEN-KA (Hibilli, Мкр=1,7), кг/м³	Щебень базальтовый Kozagac, Конья, фракция 5-12, кг/м³	Щебень базальтовый Kozagac, Конья, фракция 12-22, кг/м³	Супер-р PCE3240, % от массы вяжущего	Супер-р PCE3241, % от массы вяжущего	V вовлеченного воздуха, %
БСТ B30W4П4	Особо ответственные конструкции	150	185	165	609	258	502	485		1,40	0,50
БСТ B30W6П4		150	190	165	607	258	501	484		1,40	0,50
БСТ B30W8П4		150	195	165	606	257	500	483		1,40	0,50
БСТ B40W6П4		150	250	160	572	232	486	506		1,35	1,00
БСТ B40W6SF2		150	300	160	575	418	758	–	1,80		1,50
БСТ B50W6П4		150	280	155	568	231	483	502		1,45	1,00
БСТ B60W6П4		170	280	150	566	230	482	501		1,55	1,00
БСТ B60W10П4		170	280	150	566	230	482	501		1,55	1,00
БСТ B30W10П4	Фундаментная плита	150	195	165	606	257	500	483	–	1,40	1,00
БСТ B30W10П4		300	150	175	567	241	467	452	0,90	–	1,00
БСТ B30W6SF2, БСТ B30W10SF2		150	300	165	571	415	753	–	1,65	–	1,00
БСТ B60W10SF2	Контурные стены здания	170	280	155	558	401	791	–	791	–	1,50

Таблица 8

Экспериментальные лабораторные составы бетонных смесей

Маркировка состава	Назначение бетонной смеси	Цемент CEM I 42,5 N Medcem, кг/м³	Вода, кг/м³	Песок известняковый из отсева дробления (Мкр=2,76), HCG, кг/м³	Щебень известняковый, фракция 4-12 мм, HCG, кг/м³	Щебень известняковый, фракция 12-22 мм, HCG, кг/м³	Супер-р PCE3240, % от массы вяжущего	В.В. Добавка "Реопласт ВВ-1", % от массы цемента	V вовлеченного воздуха, %
БСТ B25W8F200П4	Рядовые конструкции	350	165	1021	371	428	0,95	0,2	4,00

В связи с тем, что завод Medcem в начале строительства был не готов выпустить необходимое количество цемента ЦЕМI 42,5Н с нормируемым минералогическим составом и ограничениями по тонкости помола, то для бетонирования бетонных подготовок под фундаментные плиты зданий разработаны и апробированы составы с применением цемента Medcem ЦЕМI 42,5R.

Для бетонирования макета и фундамента здания на 1-м этапе разработаны 2 варианта составов бетона с нормальным и пониженным тепловыделением с расходами клинкерного портландцемента 300 кг и 150 кг соответственно. Далее в процессе работы с учетом факторов, описанных выше, принят расход цемента на уровне 170 кг.

Для фундаментных плит зданий разработан и апробирован самоуплотняющийся бетон с пониженным тепловыделением.

Для контурных стен здания реактора, с учетом результатов апробации составов бетона, разработан самоуплотняющийся бетон с пониженным тепловыделением.

Расходы материалов по всем составам уточнены по итогам новых лабораторных замесов с учетом изменения качества сырьевых материалов и результатов промышленных апробаций.

Однако представленные лабораторные составы в производстве могут подвергаться корректировке при изменении качественных показателей сырьевых материалов и особенностей работы разных бетоносмесительных установок.

В процессе работы на объекте, исходя из фактических задач и ситуации, наличия и возможности поставки материалов, процесса согласования карт подбора и т.д. разработаны 5 итераций составов. В обобщенном виде принципиально это выглядит следующим образом:

– изначально принято, что бетоны классов В30 и выше применяются для ответственных массивных конструкций, соответственно имеется ограничение по температуре в ядре конструкции, и составы для таких бетонов разработаны по концепции 150 кг (170 кг) цемента плюс молотый доменный гранулированный шлак. Для многих таких бетонов проектная прочность задана в возрасте 90 суток. В качестве заполнителя использован природный песок, отсев дробления и щебень карьеров Ченгиз, в качестве вяжущего – композит цемента CEM I 42,5N завода Medcem и молотый доменный гранулированный шлак.

– рядовые бетоны классов В7,5-В25 изготовлены на отсеве дробления и щебне карьера «HCG», без природного песка, на композите вяжущего CEM I 42,5R (без ограничения по минимальному расходу) и золы-уноса. В качестве ориентиров по выбору расхода цемента и общего содержания вяжущего – требования по достижению прочности и водонепроницаемости.

– далее, для минимизации номенклатуры применяемых материалов, для всех бетонов перешли на применение природного песка «DEN-KA», отсева и щебней фракций 4-11 и 11-22 производства «Cengiz», цемента CEM I 42,5N и молотого доменного граншлака «Искендерун-2».

Обсуждение и заключения. Таким образом, по результатам данного исследования были выполнены все поставленные задачи, а именно:

1) проведен анализ рынка сырьевых материалов для производства бетонных смесей и сформирован их перечень;

2) проведены лабораторные исследования потенциальных для изготовления бетонных смесей сырьевых материалов и определены их фактические физико-механические характеристики;

3) определен перечень основных компонентов, отвечающих нормам атомной энергетики и требованиям российской, европейской и турецкой нормативно-технической базы;

4) разработаны лабораторные составы бетонных смесей с классификацией по их назначению.

Дальнейшая перспективность данного исследования заключается в макетировании опытных блоков (сегмент фундаментной плиты здания, сегмент контурной стены) с апробацией разработанных составов самоуплотняющихся бетонных смесей. А также предполагается подтверждение соответствия подобранных составов бетона задачам бетонирования массивных блоков в условиях высоких температур наружного воздуха и получение данных объективного контроля распределения температуры по объему бетона во времени, в том числе, с целью использования их при расчете терм напряжённого состояния конструкций.

Библиографический список

1. An intelligent model for the prediction of the compressive strength of cementitious composites with ground granulated blast furnace slag based on ultrasonic pulse velocity measurements/ S. Czarnecki, M. Shariq, M. Nikoo, Ł. Sadowski // Measurement. — 2021. — Vol. 172, No. 108951. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108951

2. End-of-Life Materials Used as Supplementary Cementitious Materials in the Concrete Industry/ A.I. Nicoara, A.E. Stoica, M. Vrabec [и др.] // Materials. – 2020. – Vol. 13, No 1954. https://doi.org/10.3390/ma13081954

3. Predicting the compressive strength of concrete with fly ash admixture using machine learning algorithms/ H. Song, A. Ahmad, F. Farooq [и др.]// Construction and Building Materials. — 2021. — Vol. 308, No. 125021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125021

4. Recycling Aggregates for Self-Compacting Concrete Production: A Feasible Option / R. Martínez-García, M.I. Guerra-Romero, J.M. Morán-del Pozo [и др.] // Materials. — 2020. — Vol. 13, No. 868. https://doi.org/10.3390/ma13040868

5. Microstructure and Fresh Properties of Self-compacting Concrete with Recycled Sand / D. Carro-López, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella [и др.] // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 171. — P. 645–657. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.401

6. Mechanical Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete with Fine and Coarse Recycled Aggregates from the Precast Industry / S.A. Santos, P.R. Da Silva, J. De Brito // Materials. — 2017. — Vol. 10, No. 904. https://doi.org/10.3390/ma10080904

7. Durability of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants / A.R. Esquinas, J.I. Álvarez, J.R. Jiménez [и др.] // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 161. — P. 407–419. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.142

8. Effect of red mud (bauxite residue) as cement replacement on the properties of self-compacting concrete incorporating various fillers / M. Ghalehnovi, N. Roshan, E. Hakak ets. // Journal of Cleaner Production. — 2019. — Vol. 240, No. 118213. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118213

9. Flexural strengthening of damaged RC T-beams using self-compacting concrete jacketing under different sustaining load / X. Zhang, Y. Luo, L. Wang [и др.] // Construction and Building Materials. — 2018. — Vol. 172. — P. 185–195. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.245

10. Rehabilitation of Shear-Damaged Reinforced Concrete Beams Using Self-Compacting Concrete Jacketing / C. E. Chalioris, C. N. Pourzitidis // ISRN Civil Engineering. — 2012. — Vol. 2012. https://doi.org/10.5402/2012/816107

11. Numerical Modelling and Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams / O. Sucharda, J. Brozovsky, D. Mikolášek // Key Engineering Materials. — 2013. — Vol. 577–578. — P. 281-284. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.577-578.281

12. An intelligent model for the prediction of the compressive strength of cementitious composites with ground granulated blast furnace slag based on ultrasonic pulse velocity measurements / S. Czarnecki, M. Shariq, M. Nikoo, Ł. Sadowski // Measurement. — 2021. — Vol. 172, No. 108951. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108951

13. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag / H. Yazıcı, M. Y. Yardımcı, H. Yiğiter [и др.] // Cement and Concrete Composites. — 2010. — Vol. 32, No. 8. — P. 639–648. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.005

14. Properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS) at elevated temperatures / R. Siddique, D. Kaur // Journal of Advanced Research. — 2012. Vol. 3, No 1. — P. 45–51. https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.03.004

15. Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives / Ö. Çakır // Construction and Building Materials. — 2014. — Vol. 68. — P. 17–25. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.032

16. Experimental study on the engineering properties of alkali-activated GGBFS/FA concrete and constitutive models for performance prediction / X. Cong, W. Zhou, M. Elchalakani // Construction and Building Materials. — 2020. — Vol. 240, No 117977. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117977

17. Creep and drying shrinkage of concrete containing GGBFS / M. Shariq, J. Prasad, H. Abbas // Cement and Concrete Composites. — 2016. — Vol. 68. — P. 35–45. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.004

18. Несветаев, Г. В. Самоуплотняющиеся бетоны: прочность и проектирование состава / Г. В. Несветаев, А. Н. Давидюк // Строительные материалы. — 2009. — № 5. — С. 54–57.

19. Баженов, Ю. М. Современная технология бетона / Ю. М. Баженов // Технологии бетонов. — 2005. — № 1. — С. 6–8.

Поступила в редакцию 16.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Развеева Ирина Федоровна — старший преподаватель кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, razveevai@mail.ru

Иванченко Сергей Анатольевич, компания «Реопласт», Донской государственный технический университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), sergey.ivanchenko@rheoplast.ru

Бондаренко Иван Владимирович — студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), i.bondarenko@eucrst.com

Котенко Мария Павловна — студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, maria.kotencko2016@yandex.ru

Федчишена Анастасия Анатольевна — студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), afedchishena@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

И.Ф. Развеева, С.А. Иванченко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. И.В. Бондаренко, М.П. Котенко, А.А. Федчишена — анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.